

高温環境下における永久磁石の交流磁気損失測定

Measurement of AC-Magnetic Loss in Permanent Magnets at High Temperature

高崎 亜希 TAKAZAKI Aki JFE テクノリサーチ 機能材料ソリューション本部 電池試作・解析センター 主査 (係長)

要旨

EV/HEV (電気自動車/ハイブリッド電気自動車)用のモータには、高い残留磁束密度と保磁力を持つネオジム焼結磁石が主に用いられている。ネオジム焼結磁石はフェライト磁石などの他の永久磁石に比べて電気抵抗率が低く、交流磁界印加時の渦電流損失が大きいため、損失に伴う発熱による磁石の熱減磁の懸念がある。このため、磁石の磁気損失を評価することが重要で、特にモータの内部環境(70℃~120℃)に対応した評価方法が必要である。このような背景から、JFE テクノリサーチは高温環境下における交流磁気損失の評価方法を開発した^{1,2)}。本稿では、諸特性が異なるネオジム焼結磁石の高温での測定データを提示した。測定データから、同じネオジム焼結磁石であっても、諸特性の異なる磁石では交流磁気損失の温度変化挙動は異なることを示し、保磁力などの基本的な磁気特性パラメータと損失の温度変化挙動を単純に関連づけられないことを示した。また、交流磁気損失の温度変化挙動は、古典渦電流損失の温度変化挙動だけでは説明できないことを示した。

Abstract:

Most EV/HEV have adopted Nd-Fe-B sintered magnet having high coercive field strength and remanent flux density. AC-magnetic loss in Nd-Fe-B sintered magnets is relatively large compared to ferrite magnets and other permanent magnets due to low electrical resistivity of Nd-Fe-B sintered magnets and there is a concern that the magnet is demagnetized by heat generated from AC-magnetic loss. The evaluation of the AC-magnetic loss especially at high temperature corresponding to internal environment in the motor during driving is important and the measurement-system for evaluation of the AC-magnetic loss was developed. In this paper, the behavior change of the AC-magnetic loss at high temperature (−200°C) in Nd-Fe-B sintered magnets having various H_{cj} and B_r was presented. They indicated that the behavior is different between each Nd-Fe-B sintered magnet, and that it is difficult to consider the behavior associating the loss with basic magnetic properties in the magnets such as H_{cj} and B_r . Furthermore, it was clarified that it is unable to understand the loss-behavior from the change of classical eddy current loss.

1. はじめに

地球環境の保護がますます重要視される中、環境負荷の低いEV/HEV(電気自動車/ハイブリッド電気自動車)の生産台数は増加し続けている。EV/HEVにおいて、モータは車自体のエネルギー効率を決定づける基幹モジュールであり、モータに用いられる部材である永久磁石はモータのエネルギー効率を左右する重要な磁性材料である。EV/HEV用の駆動モータには小型、高出力、高効率が求められている背景から、永久磁石の中でも高い残留磁束密度と保磁力を持つネオジム焼結磁石がモータ用部材として採用されている。

しかし、ネオジム焼結磁石には特有の課題がある。ネオジム焼結磁石はフェライト磁石等の他の永久磁石に比べて電気抵抗率が低い場合、モータ駆動のために発生させる交

流磁界を磁石が受けた時に発生する渦電流が大きい。さらに、この渦電流は、インバータのキャリア波形や回転機構造に起因するスロット高調波の影響を受けることで顕著になる。この渦電流による損失が大きい場合、損失に伴う発熱により磁石の温度が上昇し、磁石が熱減磁する懸念がある。このため、モータの技術開発にあたっては、まず、磁石の損失を測定する必要がある。

永久磁石の損失の実測方法として種々の方法が報告されているが³⁻⁶⁾、これらはいずれも室温での評価方法である。

モータが駆動している時、モータ内の温度は室温ではない。これは、駆動時にコアの鉄損やコイルの銅損、回転時の機械損、および風損が発生し、この損失に伴いモータが発熱するためである。その結果、モータの内部は室温より高く、コア内部の磁石は70℃~120℃の高温にさらされる。このため、磁石の損失評価は、モータ駆動時の温度環境に即

2023年3月27日受付

した高温下で行うことが望ましい。しかし、高温下における磁石の磁気損失の実測事例は報告されていない。このような背景を踏まえ、当社では、200℃までの磁石の磁気損失測定手法を開発した。

ネオジム焼結磁石の磁気特性は、温度で顕著に変化することがよく知られているが、交流磁気損失は温度に対してどのように変化するかは知られていない。磁石が受ける交流磁界の周波数が高い時、磁石で発生する交流磁気損失は渦電流損失が主であり、電気抵抗は温度上昇にしたがい増加するため、交流磁気損失は温度に対して減少すると予想されることが多い。

本稿では、磁石における交流磁気損失評価の考え方、測定法の概説を述べ、諸特性が異なるネオジム焼結磁石の損失の温度依存性を示し、その挙動について考察した。

2. 磁石における交流磁気損失

2.1 磁石の交流磁気損失

1章で、モータ駆動時にモータコア内の磁石には磁気損失があることを述べた。この損失はモータの交流磁界を磁石が受けたことで発生する磁気損失（交流磁気損失）である。この交流磁気損失は一般的にヒステリシス損失と渦電流損失に大別される。渦電流損失は、磁石が外部から交流磁場を受けた時に磁石内部で渦電流が生じることに伴うエネルギー損失である。一方、磁石に交流磁界を印加した時にヒステリシス損失があることも先行研究よりわかっているが⁵⁾、交流磁界の印加に伴うヒステリシス損失の発生機構は不明である。

本研究では、渦電流損失とヒステリシス損失の和である交流磁気損失を高温で評価する方法を開発した。その評価法を次節で説明する。

2.2 磁石の交流磁気損失評価法

先行研究によると磁石の交流磁気損失は下記式 (1) で算出できる⁵⁾。

$$W_t = \frac{f}{\rho_m} \int HdB [W / kg] \dots\dots\dots (1)$$

式 (1) において、 H は磁石に外部から印加する交流磁界の磁界強度、 B は交流磁界印加時の磁石の B 、 f は印加する交流磁界の周波数、 ρ_m は磁石の密度である。このため、印加する交流磁界の H を測定し、その時の磁石の磁束密度 B を測定・算出することで、磁石の交流磁気損失を算出、評価できる。式 (1) の現象上の意味は次節で述べる。

2.3 現象の理解と交流マイナーループ

交流磁界を磁石に印加したときの磁石内部におけるミクロな磁気的変動は明らかになっていないため、式 (1) から理

解できる範囲での現象を概説する。直流磁界を磁石に印加すると、磁界の向きによって磁石は磁化または減磁し、磁石の磁束密度は変化する。一方、交流磁気損失の評価で印加する磁界は、磁界の向きが周期的に変動する交流磁界であるため、軟磁性体と比べて着磁・脱磁が容易でない永久磁石では、磁化や減磁は起こらない。交流磁界を磁石に印加したときの B - H ループを図 1 に示す。図 1 のループは、便宜上、交流マイナーループと呼称する。このような波形が得られるとき磁石の B は周期的に振動している。

式 (1) における積分項は、この交流マイナーループのループ面積に相当している。このことは、交流マイナーループのループ形状が変化すると交流磁気損失が変化し、ループ面積が小さくなると交流磁気損失も小さくなることを意味する。

3. 測定方法・実験方法

3.1 測定方法

2章で、磁石の交流磁気損失は、印加する交流磁界の H を測定し、その時の磁石の磁束密度 B を測定・算出し、式 (1) を用いて算出できることを示した。ここでは、実際に H 、 B を測定する方法を紹介する。図 2、図 3 に測定に用いる磁気測定用測定枠の模式図を示す。この測定枠において、磁石は励磁コイルの内部に設置し、磁石への交流磁界の印加は、この励磁コイルに通電した時に発生する交流磁界で行う。磁石の磁束密度 B は、磁石の外周に設置した検出コイルで取得する。磁束密度 B ではなく磁気分極 J を検出するコイルでも同様に測定できる。印加磁界 H の値は、磁石の外周に設置した磁界強度検出コイルで取得した。これら検出コイルは先行研究⁵⁾の手法により作製した。

図 2 と図 3 の違いについて説明する。図 2 は閉磁路タイプで、図 3 は開磁路タイプである。図 2 のようにヨークで閉磁路を形成することで、高磁場も印加可能になる。この場合、磁石が着磁品であっても、磁石中の反磁界がない状態で評価できる。一方、図 3 のように外周のヨークがない場合、開磁路となる。この場合、磁石が着磁品であるとき、反

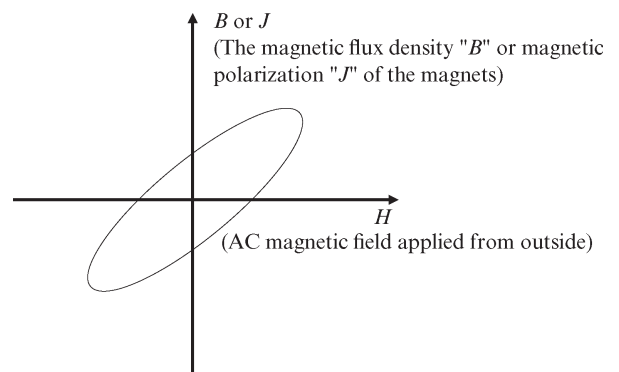


図 1 交流磁界印加時の B - H ループ（交流マイナーループ）
Fig. 1 BH -loop measured by applying AC magnetic field to magnet (AC-minor loop)

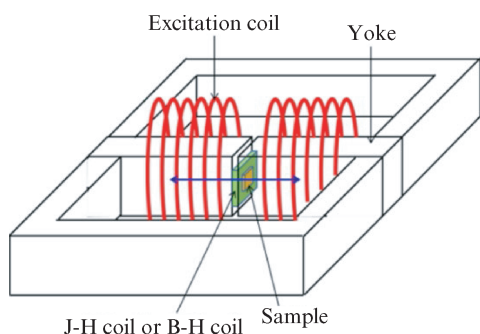


図2 磁気損失測定に用いる測定枠の模式図（閉磁路）

Fig. 2 Diagram of measurement system in AC magnetizing device (Closed magnetic circuit)

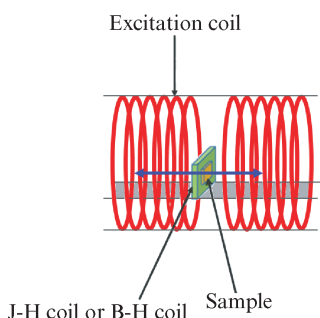


図3 磁気損失測定に用いる測定枠の模式図（開磁路）

Fig. 3 Diagram of measurement system in AC magnetizing device (Open magnetic circuit)

磁界がある状態で評価することになる。本稿で示したデータは開磁路（図3）で評価したものである。

3.2 評価磁石

諸特性の異なる4種のネオジム焼結磁石（Sample #A, #B, #C, #D）を評価した。これらの基本的な特性値を表1に示す。Sample #A, #B, #Cは表面酸化処理されたもので、Sample #Dはニッケルメッキ品である。試料のサイズはすべて長さ7mm×幅7mm×高さ7mm（高さ7mmが磁化容易方向）である。これらは磁化容易軸方向に着磁されたもので、着磁方向に交流磁界を印加し、交流磁気損失を測定した。

3.3 測定条件

この開磁路測定枠（図3）で発生交流磁界を磁石に印加し、損失を測定した。交流磁界の周波数は1kHz、磁界強度Hは±8kA/mで、室温から160℃程度までの交流磁気損失を測定した。

3.4 高温での測定方法

高温下の測定は、写真1に示すように図3の測定枠を高温に温度制御できる恒温槽に設置して行った。図3の測定枠は、高温での測定を可能にするため、200℃程度までの耐熱性を有する導線や、500℃程度までの耐熱性を有するボビ

表1 評価磁石の諸特性

Table 1 Magnetic property of magnets

Sample	B_r (T)	H_{cj} (kA/m)	H_k/H_{cj} (%)	Surface treatment
#A	1.26	1 818	98.5	Oxidation treatment
#B	1.28	1 812	99.0	
#C	1.45	1 114	99.2	
#D	1.22	1 115	97.0	Nickel plating

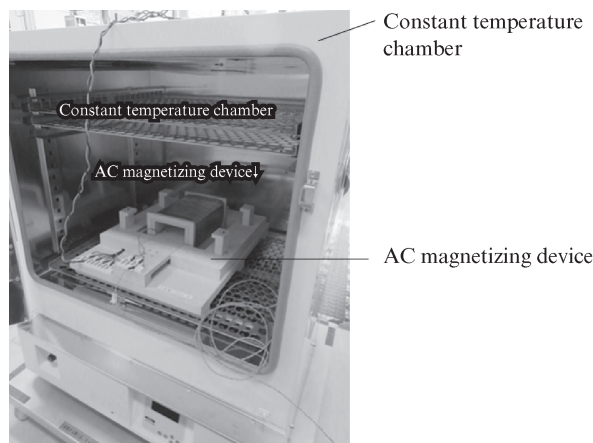


写真1 高温での測定の様子（開磁路 図3）

Photo 1 Measurement at high temperature (Open magnetic circuit)

で構成されている。高温で図3の測定枠を用いたときの交流磁気損失の評価誤差は±3%以下である。

恒温槽の昇温速度は、約0.9℃/minとし、試料温度が測定目標温度に到達したことを確認した後、測定した。試料温度はコイルの巻き枠の温度より3℃低いため、巻き枠の測定温度から3℃引くことで損失測定時の試料温度を算出した。巻き枠の温度測定は、コイルの巻き枠に取り付けた熱電対で行った。

3.5 直流電気抵抗率測定

磁石における交流磁気損失はヒステリシス損失と渦電流損失からなるが、先行研究³⁾によると磁石が着磁品であるとき、交流磁気損失≒渦電流損失と考えられる。また、渦電流損失は古典渦電流損失と異常渦電流損失に分けられるが、先行研究³⁾にならって渦電流損失=古典渦電流損失として温度による交流磁気損失の変化挙動を解析した。

上記の古典渦電流損失は、磁石の磁束密度の2乗に比例し、磁石の直流電気抵抗率に反比例するため³⁾、磁石の磁束密度や直流電気抵抗率の温度変化挙動を調べることで、古典渦電流損失（≒交流磁気損失）の温度変化挙動を解釈できる。このため、各磁石における直流電気抵抗率の温度変化を調べた。

直流電気抵抗率測定は、直流四端子法で行い、長さ

10 mm×幅 15 mm×高さ 7 mm の試料を用いた。なお、Sample #D のみ長さ 7 mm×幅 7 mm×高さ 7 mm の試料を用いた。いずれも、高さ 7 mm 方向が磁化容易軸方向である。磁石への通電は、磁石に溶接した導線で行い、幅と平行方向に通電した。高温下における測定は、導線を溶接した磁石を恒温槽に入れて実施した。そのときの磁石の温度は、磁石の底面に取り付けた熱電対で測定した。磁石の昇温速度は約 0.5°C/min とした。

4. 測定結果

4.1 交流磁気損失測定結果

図 4 に各磁石における交流磁気損失の温度変化を示す。グラフの縦軸は室温からの交流磁気損失の変化率であり、横軸は磁石の温度である。縦軸の変化率 ΔW_t は式 (2) より算出した。

$$\Delta W_t[\%] = \frac{W_{tT'} - W_{tRT}}{W_{tRT}} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

W_{tRT} : 室温の交流磁気損失

$W_{tT'}$: 任意の高温 T' の交流磁気損失

この縦軸の変化率が負である場合は、昇温による交流磁気損失の減少を意味し、正である場合は、昇温による交流磁気損失の増加を意味する。Sample #A, #B の交流磁気損失は、温度上昇に伴い、ほぼ単調に減少した。一方、Sample #D の交流磁気損失は、100°C 付近から急激に増加した。また、Sample #C の交流磁気損失は、130°C 付近より急激な減少を示した。この結果より、諸特性の異なるネオジム焼結磁石は、交流磁気損失の温度依存性が異なることがわかった。また、表 1 と図 4 を比較すると、交流磁気損失の温度変化挙動は、基本特性値である保磁力 H_{cj} や、残留磁束密度 B_r などとは単純に相関しないことがわかった。

4.2 直流電気抵抗率測定結果

図 5 に各磁石における直流電気抵抗率の温度依存性を示す。図 5 の縦軸は室温からの電気抵抗率の変化率であり、横軸は磁石の温度である。電気抵抗率の変化率 $\Delta\rho_t$ は下記式 (3) で算出した。

$$\Delta\rho_t[\%] = \frac{\rho_{tT'} - \rho_{tRT}}{\rho_{tRT}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

ρ_{tRT} : 室温の電気抵抗率

$\rho_{tT'}$: 任意の高温 T' の電気抵抗率

この縦軸の負の変化率は昇温による電気抵抗率の低下を意味し、正の変化率は昇温による電気抵抗率の上昇を意味する。図 5 のとおり各磁石の電気抵抗率は同様に線形的に上

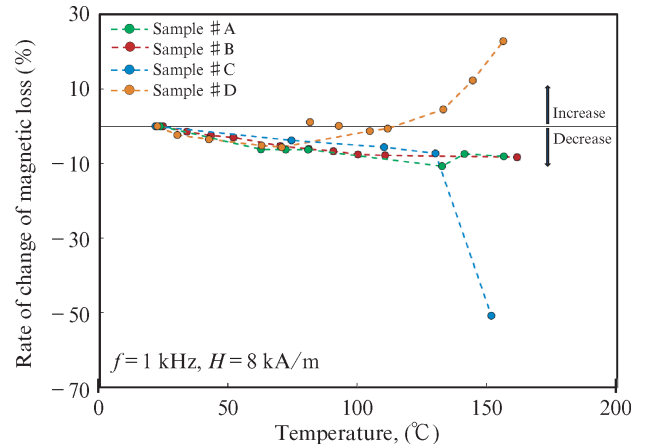


図 4 交流磁気損失の変化率の温度依存性
Fig. 4 Change rate of AC-magnetic loss against temperature

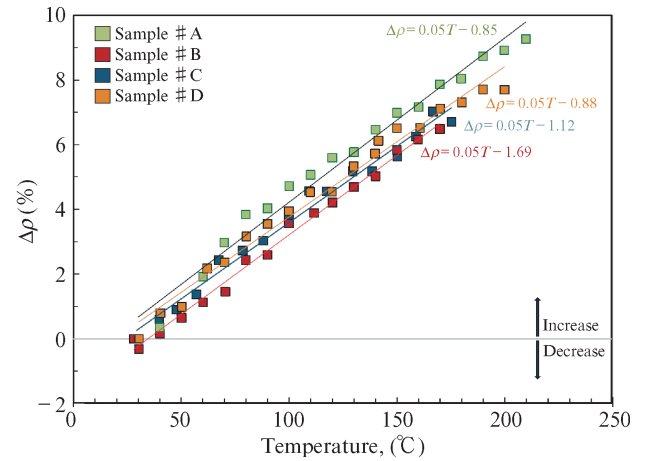


図 5 電気抵抗率の温度依存性
Fig. 5 Change rate of electrical resistance against temperature

昇した。この上昇係数は同じ程度であり、約 0.05%/°C であった。交流磁気損失の温度変化挙動は各磁石で差異があったが、電気抵抗率の温度依存性は、各磁石で顕著な差が見られなかった。

4.3 磁石の最大磁束密度振幅の温度依存性

3.5 節で、古典渦電流損失は磁石の磁束密度の 2 乗に比例すると述べた。図 6 に磁石の磁束密度の 2 乗値の温度依存性を示す。ここでの磁石の磁束密度の 2 乗値は、交流マイナーループの最大磁束密度振幅 B_m の 2 乗とした。図中の縦軸は室温からの最大磁束密度振幅の 2 乗値の変化率であり、横軸は磁石の温度である。縦軸の変化率は下記式 (4) で算出している。

$$\Delta B_m^2[\%] = \frac{B_{mT'}^2 - B_{mRT}^2}{B_{mRT}^2} \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

B_{mRT}^2 : 室温の最大磁束密度振幅 B_m の 2 乗

$B_{mT'}^2$: 任意の高温 T' の最大磁束密度振幅 B_m の 2 乗

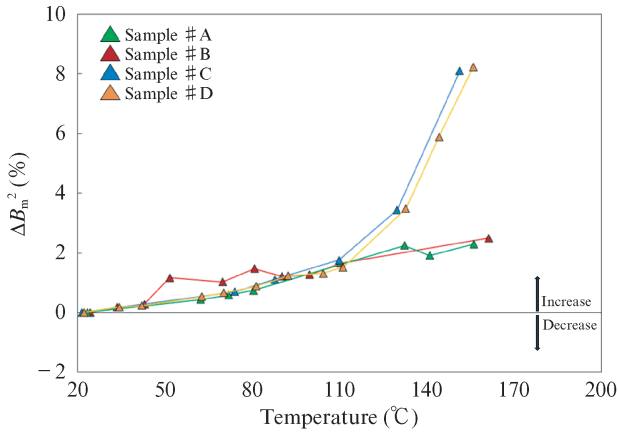


図6 B_m^2 の変化率の温度依存性

Fig. 6 Change rate of B-amplitude against temperature

この縦軸の負の変化率は昇温による最大磁束密度振幅の低下を意味し、正の変化率は昇温による最大磁束密度振幅の上昇を意味する。Sample #A, #B の ΔB_m^2 は、温度上昇に伴い、ほぼ直線的に増加した。一方、Sample #C, #D は 110°C 付近まではほぼ直線的に上昇し、110°C 以降はさらに急激に上昇した。

5. 考察

交流磁気損失 W_t は、渦電流損失 W_e とヒステリシス損失 W_h からなり、その関係は下記の式 (5) のとおりである⁵⁾。

$$W_t [\text{W / kg}] = W_h [\text{W / kg}] + W_e [\text{W / kg}] \dots\dots\dots (5)$$

$$= k_h f B^2 + k_e f^2 B^2$$

- f : 周波数, B : 磁石の磁束密度
- k_h : ヒステリシス損失に関わる定数
- k_e : 渦電流損失に関わる定数

式 (5) を踏まえ、交流磁気損失におけるヒステリシス損失 W_h と渦電流損失 W_e の割合を考えると、今回の周波数条件 1 kHz では、交流磁気損失 W_t の内、渦電流損失 W_e が占める割合が非常に高いと考えられる (これは k_h は k_e の千倍以上大きくならないという前提に基づく考察である)。このため、先行研究結果³⁾ を踏まえ、古典渦電流損のみで交流磁気損失の温度変化挙動を考察した。3.5 節で述べたとおり、古典渦電流損 W_e は電気抵抗率に反比例し、磁束密度の 2 乗に比例する。このため、下記式 (6) の関係にあるとして考察を進める。

$$W_t \cong W_e \propto \frac{B_m^2}{\rho} \dots\dots\dots (6)$$

*磁石の B は最大磁束密度振幅 B_m とした。

式 (6)、図 5、図 6 から交流磁気損失の温度変化を予想す

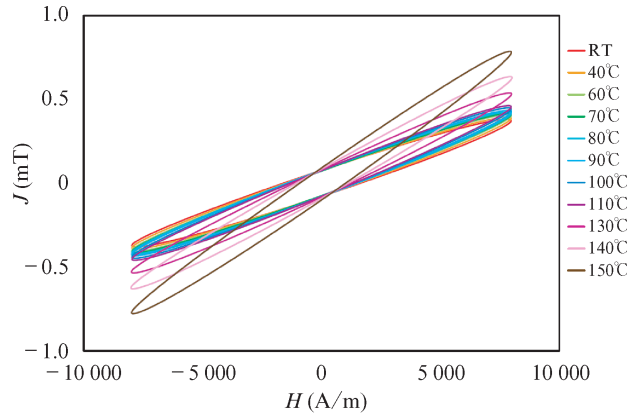


図7 Sample #D の交流マイナーループ (J-H)

Fig. 7 AC-minor loop in sample #D (J-H loop)

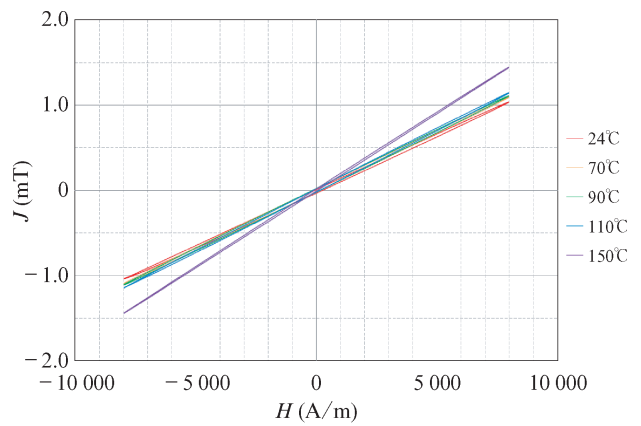


図8 Sample #C の交流マイナーループ (J-H)

Fig. 8 AC-minor loop in sample #C (J-H loop)

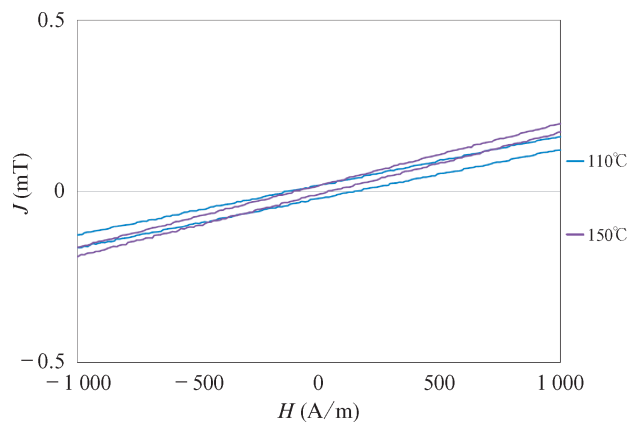


図9 Sample #C の交流マイナーループ拡大 (J-H)

Fig. 9 Enlarged view of AC-minor loop in sample #C

ると、Sample #A, #B では、各温度で $\Delta \rho \geq \Delta B_m^2$ の関係で、 ρ と B_m^2 がそれぞれ増加するため、 W_t は温度上昇に伴い単調に減少すると予想される。この予想は図 4 の結果と一致しているため、Sample #A, #B の ΔW_t の挙動は、 ΔW_e の挙動が主に寄与していると考えられる (各温度で、 $W_t \cong W_e$ であることを意味する)。一方、Sample #C, #D では、約

140℃までは、 $\Delta\rho > \Delta B_m^2$ の関係で ρ と B_m^2 がそれぞれ増加するが、110℃以降で ΔB_m^2 が急激に増大するため、140℃以降は ΔB_m^2 が $\Delta\rho$ を越える($\Delta\rho < \Delta B_m^2$)。このため、Sample #C、#Dの W_t は140℃まで減少し、140℃以降急激に増大すると予想される。しかし、この予想に反し、図4の結果ではSample #Cは130℃以降で急激な減少を示している。このことから、Sample #Cの交流磁気損失の温度変化挙動は、式(6)の関係だけで考えることができず、交流磁気損失の温度変化の予測は、古典渦電流損失の変化挙動を考えるだけでは不十分であると言える。

最後に、Sample #C、#Dの温度上昇に伴う ΔW_t の挙動を交流マイナーループ形状の温度変化から考察した(交流マイナーループの面積は W_t に比例)。交流マイナーループは、形状変化が分かりやすいJ-Hループを記載した。 J と B は「 $B = \mu_0 H + J$ 」の関係にあるため、今回の測定のように H が一定であるとき、 J と B の増減挙動は同じである。図7にSample #Dの交流J-Hマイナーループを示す。温度上昇に伴い、最大磁気分極振幅 J_m は増加し、特に、110℃以降、 J_m は急な増加を示した。一方、ループ幅には顕著な変化は見られなかった。このことより、Sample #Dにおける100℃付近からの急な交流磁気損失の増加は、 B_m^2 ($\equiv J_m^2$)の増加によるものであるとわかる。一方、図8にSample #CのJ-Hマイナーループを示し、図9に図8の拡大図(110℃、150℃のみ)を示す。温度上昇に伴い、 J_m は増加する傾向を示し、特に150℃で急激に増加した(図8)。一方、ループ幅は150℃で狭まる挙動を示した(図9)。このループ挙動より、Sample #Cにおける130℃以降の交流磁気損失 W_t の急激な減少は、交流マイナーループのループ幅の減少によるものと推定される。さらに減少を理解するためには、交流マイナーループの形状変化と交流磁気損失 W_t の関係の解明が重要であり、そのためには、高温環境下における交流磁気損失のデータの蓄積が重要である。また、さらなる十分な解釈を与えるためには、ヒステリシス損失 W_h の温度変化挙動の解明も必要である。

6. おわりに

- EV/HEV用のモータで使われるネオジム焼結磁石は、電気抵抗率が低いため、交流磁気損失を把握する必要がある。そのため、下記の評価手法を開発し、実測によ

り検討した。

- モータの内部環境(70℃~120℃)に即した、磁石の高温環境下における交流磁気損失の評価方法を開発した。
- 基本的な諸特性が異なるネオジム焼結磁石の高温環境下における磁石損失を測定し、測定データから下記を結論付けた。
- 同じネオジム焼結磁石であっても、諸特性の違いにより、交流磁気損失の温度変化挙動は異なることを示した。
- 保磁力などの基本的な特性パラメータと交流磁気損失の温度変化挙動を単純に関連づけることは難しいことを示した。
- 交流磁気損失の温度変化挙動は、古典渦電流損失の温度変化挙動(≒電気抵抗率の挙動)だけでは説明できないことを示した。

以上のように磁石の交流磁気損失の温度変化挙動は、従来知見のみでは予想できないため、交流磁気損失の温度変化挙動を実測で測定することは重要である。

謝辞

本研究の推進にあたり、東京大学の清水先生、TDK株式会社の武田氏、眞保氏、榎戸氏には、測定方法やデータの解釈についてともにご検討いただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 高崎亜希, 中田崇寛, 清水修, 武田啓司, 眞保信之, 榎戸靖. 高温環境下におけるNd-Fe-B焼結磁石の交流損失の計測と解析. マグネティックス研究会. 2021, MAG-21-044.
- 高崎亜希, 中田崇寛, 清水修, 武田啓司, 眞保信之, 榎戸靖. Nd-Fe-B焼結磁石における交流損失と微細構造の関係. 2021年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2021, no. 4-11, p. 129-132.
- 伊藤馨, 橋場豊, 堺和人, 八木澤猛. 希土類永久磁石の交流磁気損失. 電気学会論文誌A. 1998, vol. 118, no. 2, p. 182-187.
- 青山康明, 大橋健, 宮田浩二. 交番磁界中の永久磁石における渦電流損失の解析と実験. 電気学会回転機研究会資料. 2002, RM-02-135, p. 13-18.
- 金澤真一, 高橋則雄, 保武春. ネオジム焼結磁石の交流磁気損失の測定並びに解析との比較. 電気学会論文誌A. 2004, vol. 124, no. 10, p. 869-875.
- 清水修, 藤本博志, 中田崇寛, 米山勝也, 武田啓司, 榎戸靖. 永久磁石における損失の単体計測と解析による評価. 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2019, no. 4-5, p. 99-102.